

**Enhancement of image quality by utilization of a priori information**

Patent Number: ☐ US492049

Publication date: 1990-04-24

Inventor(s): EBERHARD JEFFREY W (US); HEDENGREN KRISTINA H (US)

Applicant(s): GEN ELECTRIC (US)

Requested Patent: ☐ DE3915370

Application Number: US19880194235 19880516

Priority Number(s): US19880194235 19880516

IPC Classification: G01N23/04; G06F15/42

EC Classification: G01N23/04D, G06T11/00T

Equivalents: ☐ FR2631475, ☐ GB22220830, ☐ IT1235877, ☐ JP2050779

**Abstract**

The quality of incomplete data Non-Destructive Evaluation and Computed Tomography images is improved by incorporating a priori information into the image reconstruction and image processing to supplement the available data. The a priori information is provided by electronic models of the part derived from a solid modeler, physics of the inspection process, and outputs of touch and other sensors. Methods of improving limited-angle X-ray CT images are given. Calculated projection data in the missing angular range is provided by calculating x-ray path lengths through a solid model of the part, and x-ray attenuation from known physical parameters of the part and source. The measured and calculated projection data are combined to reconstruct the CT image. In an iterative reconstruction approach, precise boundary information from a model and calculated attenuation are information to improve the limited angle image.

Data supplied from the esp@cenet database - 12

[illegible]

the 1990s, the number of people in the world who are under 15 years of age is expected to increase from 1.1 billion to 1.5 billion. The number of people aged 65 and over is expected to increase from 250 million to 450 million. The number of people aged 15 and over is expected to increase from 3.5 billion to 4.5 billion. The number of people aged 15 and over is expected to increase from 3.5 billion to 4.5 billion. The number of people aged 15 and over is expected to increase from 3.5 billion to 4.5 billion.

/

<sup>a</sup> The number of subjects who were included in each group was 10.

Die Qualität von bei der zerstörungsfreien Untersuchung und der Computertomographie erhaltenen, auf unvollständigen Daten beruhenden Bildern wird durch Einbeziehen von Apriori-Information in die Bildrekonstruktion und die Bildverarbeitung verbessert, um die verfügbaren Daten zu ergänzen. Die Apriori-Information wird von elektronischen Modellen des Teiles geliefert, die von einem festen Modell-Teiler abgeleitet sind, der Physik des Untersuchungsverfahrens und der Anzeigen von Berührungs- und anderen Sensoren, Verfahren zum Verbessern von Röntgen-Tomographie-Bildern mit begrenztem Winkel sind angegeben. Errechnete Projektionsdaten im fehlenden Winkelbereich werden gefertigt durch Berechnen der Röntgen-Pfadlängen durch ein festes Modell des Teiles, die Röntgenschwächung aus bekannten physikalischen Parametern des Teiles und der Quelle. Die gemessenen und errechneten Projektionsdaten werden kombiniert, um das Computertomographie-Bild zu rekonstruieren. Ein Herangehen über die iterative Rekonstruktion, genaue Information über die Grenzen von einem Modell und berechnete Schwächung sind Information, um das Bild aus begrenztem Winkel zu verbessern.

(54) Verbesserung der Bildqualität durch Benutzung von a priori-Information

<p>(30) Unionspriorität: (22) (33) (31) 16.05.88 US 194235</p> <p>(71) Anmelder: General Electric Co., Schenectady, N.Y., US</p> <p>(74) Vertreter: Schüler, H., Dipl.-Chem. Dr.rer.nat., Pat.-Anw., 6000 Frankfurt</p>	<p>(72) Erfinder: Eberhard, Jeffrey Wayne; Hedengren, Kristina Helena Valborg, Schenectady, N.Y., US</p>
---	--

PATENTAMT

DEUTSCHES



DEUTSCHLAND

(19) BUNDESREPUBLIK

(12) **Offenlegungsschrift** (11) **DE 3915370 A1**

(21) Aktenzeichen: P 39 15 370.3  
 (22) Anmeldetag: 11. 5. 89  
 (43) Offenlegungstag: 30. 11. 89

(51) Int. Cl. 4: G 01 N 23/04  
 G 06 F 15/62  
 G 03 B 42/00

DE 3915370 A1

ebenso wie die physikalischen Eigenschaften des Teiles

und die Abbildungsmittelquelle; Dritten können andere Sensoren anzeigen, die während der Untersuchung des Teiles erhalten worden sind, wie die Information über die Grenze von einem Berührungssensor, zusätzliche Apriori-Information liefern. Ein Vorteil des elektronischen Modells ist es, daß solche festen Modelle Information sowohl über das Innere als auch die äußere Grenze liefern.

Die Erfindung ist auf viele NDE-Abbildungstechniken und Modalitäten anwendbar, einschließlich auf Röntgen-Abbildungen, digitale Radiographie, Ultraschalluntersuchung, Wirbelstromuntersuchung sowie IR- und visuelle Inspektion, auf diese genannten Gebiete ist die Erfindung jedoch nicht beschränkt.

Ein Aspekt der Erfindung ist ein Verfahren des NDE-Abbildens unter Verwendung verbesserter Apriori-Information, umfassend die Stufen:

Abtasten eines Teiles mit einem Abbildungsmittel über einen verfügbaren Bereich und Erzeugen gemessener Parameterdaten der Abbildung;  
Schaffen eines dreidimensionalen Modells des Teiles und Errechnen der relevanten Geometrie des Teiles und Teiles und möglichst der Abbildungsmittelquelle;  
Kombinieren der Geometrie und der physikalischen Eigenschaften des Teiles und Errechnen der Parameterdaten der Abbildung über einen nicht verfügbaren Abtastbereich, der wegen physikalischer oder betriebsmäßiger Beschränkungen nicht abgetastet werden kann und Bilden eines Bildes des Teiles aus den gemessenen und errechneten Bildparameterdaten.

Die bevorzugten Ausführungsformen der Erfindung sind drei Arten des Herangehens zur Verbesserung der Qualität von Röntgen-Computertomographie-Bildern mit begrenztem Winkel unter Verwendung genauerer Apriori-Information. Der Lösungsweg über die Projektionsdaten ist ein Verfahren, umfassend das Abtasten eines Teiles mit Röntgenstrahlen über einen begrenzten Winkelbereich und das Erzeugen gemessener Projektionsdaten aus verfügbaren Betrachtungswinkeln.

Schaffen eines elektronischen Modells des Teiles, das von einem dreidimensionalen festen Modellierer abgeleitet ist und Errechnen der Röntgenschwächung aus bekannten physikalischen Parametern des Teiles und der Röntgenquelle;

Errechnen von Projektionsdaten an den fehlenden Betrachtungswinkeln aus den Pfadlängen und der Schwächung und

Rekonstruieren eines Bildes des Teiles aus den gemessenen und errechneten Projektionsdaten, die zusammen einen vollständigen Datensatz für die Computertomographie-Rekonstruktionsalgorithmen ergeben. Ein anderes Merkmal ist es, daß die Berechnung der Pfadlängen durch das elektronische Modell eine Zwischenstufe des Umwandels der Geometrie des Teiles vom festen Modell zu einem zweidimensionalen Pixelbild umfaßt, von dem die Pfadlängen errechnet werden.

Das Bild-Verarbeitungs- und -Analyseverfahren umfaßt:

Abtasten des verfügbaren Bereiches begrenzten Winkels mit Röntgenstrahlen und Rekonstruieren eines Teilbildes aus gemessenen Projektionsdaten;  
Errechnen der Projektionsdaten des Modells bei einem kompletten Satz von Betrachtungswinkeln durch das elektronische Modell und die Röntgenschwächung, wie gerade beschrieben;

Rekonstruieren eines Teilbildes des Modells von Mo-

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Verbessern der Qualität von bei der zerstörungsfreien Untersuchung erhaltenen Bildern, und sie betrifft mehr im besonderen das Einbeziehen von Apriori-Information in unvollständige Bildraten im Zusammenhang mit der zerstörungsfreien Untersuchung.

Gute Bildqualität und wesentliche Information bei unvollständigen Bildraten im Zusammenhang mit der zerstörungsfreien Untersuchung.

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Verbessern der Qualität von bei der zerstörungsfreien Untersuchung erhaltenen Bildern, und sie betrifft mehr im besonderen das Einbeziehen von Apriori-Information in unvollständige Bildraten im Zusammenhang mit der zerstörungsfreien Untersuchung.

Gute Bildqualität und wesentliche Information bei unvollständigen Bildraten im Zusammenhang mit der zerstörungsfreien Untersuchung.

Die Erfindung ist auf viele NDE-Abbildungstechniken und Modalitäten anwendbar, einschließlich auf Röntgen-Abbildungen, digitale Radiographie, Ultraschalluntersuchung, Wirbelstromuntersuchung sowie IR- und visuelle Inspektion, auf diese genannten Gebiete ist die Erfindung jedoch nicht beschränkt.

Ein Aspekt der Erfindung ist ein Verfahren des NDE-Abbildens unter Verwendung verbesserter Apriori-Information, umfassend die Stufen:

Abtasten eines Teiles mit einem Abbildungsmittel über einen verfügbaren Bereich und Erzeugen gemessener Parameterdaten der Abbildung;  
Schaffen eines dreidimensionalen Modells des Teiles und Errechnen der relevanten Geometrie des Teiles und Teiles und möglichst der Abbildungsmittelquelle;  
Kombinieren der Geometrie und der physikalischen Eigenschaften des Teiles und Errechnen der Parameterdaten der Abbildung über einen nicht verfügbaren Abtastbereich, der wegen physikalischer oder betriebsmäßiger Beschränkungen nicht abgetastet werden kann und Bilden eines Bildes des Teiles aus den gemessenen und errechneten Bildparameterdaten.

Die bevorzugten Ausführungsformen der Erfindung sind drei Arten des Herangehens zur Verbesserung der Qualität von Röntgen-Computertomographie-Bildern mit begrenztem Winkel unter Verwendung genauerer Apriori-Information. Der Lösungsweg über die Projektionsdaten ist ein Verfahren, umfassend das Abtasten eines Teiles mit Röntgenstrahlen über einen begrenzten Winkelbereich und das Erzeugen gemessener Projektionsdaten aus verfügbaren Betrachtungswinkeln.

Schaffen eines elektronischen Modells des Teiles, das von einem dreidimensionalen festen Modellierer abgeleitet ist und Errechnen der Röntgenschwächung aus bekannten physikalischen Parametern des Teiles und der Röntgenquelle;

Errechnen von Projektionsdaten an den fehlenden Betrachtungswinkeln aus den Pfadlängen und der Schwächung und

Rekonstruieren eines Bildes des Teiles aus den gemessenen und errechneten Projektionsdaten, die zusammen einen vollständigen Datensatz für die Computertomographie-Rekonstruktionsalgorithmen ergeben. Ein anderes Merkmal ist es, daß die Berechnung der Pfadlängen durch das elektronische Modell eine Zwischenstufe des Umwandels der Geometrie des Teiles vom festen Modell zu einem zweidimensionalen Pixelbild umfaßt, von dem die Pfadlängen errechnet werden.

Das Bild-Verarbeitungs- und -Analyseverfahren umfaßt:

Abtasten des verfügbaren Bereiches begrenzten Winkels mit Röntgenstrahlen und Rekonstruieren eines Teilbildes aus gemessenen Projektionsdaten;  
Errechnen der Projektionsdaten des Modells bei einem kompletten Satz von Betrachtungswinkeln durch das elektronische Modell und die Röntgenschwächung, wie gerade beschrieben;

Rekonstruieren eines Teilbildes des Modells von Mo-

Geometrie des Untersuchungsverfahrens bekannt

del-Projektionsdaten über den gleichen Winkelbereich  
Bilder des Modells von den vollständigen Modell-Pro-  
jektionsdaten und

Subtrahieren des vollständigen und des Teilbildes des  
Modells zur Schaffung eines Differenzbildes des Mo-  
dells, das einen Rekonstruktionsfehler begrenzten Win-  
kels repräsentiert und

Kombinieren des von den gemessenen Daten rekon-  
struierten Teilbildes und des Modell-Differenzbildes zur  
Schaffung eines endgültigen Bildes.

Das iterative Rekonstruktionsverfahren umfaßt das  
Abtasten des verfügbaren begrenzten Winkelbereiches  
mit Röntgenstrahlen und das Rekonstruieren eines Bil-  
des von gemessenen Daten; das Berechnen der genauen  
Grenzinformation des Teiles von einem Modell des Tei-  
les und der Röntgenschwächung aus bekannten physik-

kalischen Parametern;  
das Einstellen des Bildes mit dieser Apriori-Information,  
indem man Pixel außerhalb der Grenze des Teiles auf  
Null, negative Pixel auf Null und Pixel, die größer sind  
als ein vorausgewählter Schwächungswert, auf den Ma-

ximalwert setzt;  
Errechnen der fehlenden Projektionsdaten aus den feh-  
lenden Betrachtungswinkeln von dem modifizierten  
Bild;

Rekonstruieren eines neuen Bildes aus den gemessenen  
Projektionsdaten und errechneten fehlenden Projek-  
tionsdaten und

Iterieren bzw. Wiederholen, wie erforderlich, bis eine  
genügende Bildqualität erhalten wird.

Im folgenden wird die Erfindung unter Bezugnahme  
auf die Zeichnung näher erläutert. Im einzelnen zeigt  
Fig. 1 einen Gegenstand mit Vorsprüngen, die es un-  
möglich machen, ein Abtasten über den gesamten Win-  
kelbereich auszuführen;

Fig. 2 ein Blockdiagramm einer allgemeinen Technik  
zum Einbringen wichtiger und genauerer Apriori-Infor-  
mation über einen Gegenstand in das Verfahren zur  
Bildformation;

Fig. 3a und 3b charakteristische Merkmale von Bil-  
dern eines vertikalisierten Querschnittes durch einen Teil  
eines Triebwerkes, die mit vollständigen und unvollstän-  
digen Daten rekonstruiert wurden;

Fig. 4 eine Röntgen-Computertomographie-Untersu-  
chung des Teiles und der gemessenen Projektionen, ab-  
geleitet von einem Datensatz bei begrenztem Winkel  
und fehlenden Projektionen, errechnet aus Apriori-In-  
formation gemäß der Erfindung;

Fig. 5 ein Blockdiagramm des Herangehens mit Pro-  
jektionsdaten zur Nutzung von Apriori-Information  
und zur Verbesserung der Qualität von NDE-Bildern;

Fig. 6 die Stufen zum Berechnen fehlender Projek-  
tionsdaten, die im Vorgeannten erforderlich sind;

Fig. 7 ein Blockdiagramm des Lösungsweges mit ite-  
rativ bzw. wiederholender Rekonstruktion;

Fig. 8 die Stufen beim Errechnen und Benutzen von  
Apriori-Information gemäß der iterativen Rekonstruk-  
tionstechnik und

Fig. 9 ein Blockdiagramm der Bildanalyse und des  
Verarbeitungs-Lösungsweges zum Rekonstruieren von  
Computertomographie-Bildern.

Zwei Verfahren zum Verbessern der Qualität von Bil-  
dern aus unvollständigen NDE-Daten durch Einbringen  
von Apriori-Information sind in Fig. 2 gezeigt. Gemäß  
den Blöcken 13 bis 16 werden die verfügbaren experi-  
mentellen Daten durch den Bild-Formationsalgorithmus  
zusammen mit Apriori-Information kombiniert, um ein Zwi-

schendbild zu ergeben. Die erforderliche Apriori-Infor-

mation wird aus zwei Quellen erhalten, den Blöcken 17  
und 18, der Kenntnis der Geometrie des Teiles von Mo-  
dellen des Teiles oder von Sensoren und den physikali-  
schen Parametern des Teiles und, wenn möglich, der  
Abbildungsmittelqualitte, abgeleitet von der Kenntnis der  
Physik des Untersuchungsverfahrens. Das Zwischenbild  
mag eine ausreichende Qualität für den beabsichtigten  
Zweck haben oder nicht. Das Zwischenbild könnte Rau-  
schen enthalten oder Artefakte aufgrund von unvoll-  
ständigen Daten, z.B. Die Apriori-Information, die Blok-

ke 19 bis 21, wird durch einen Bildverarbeitungs-Algo-  
rithmus benutzt, um die Qualität des Endbildes zu ver-  
bessern. Die Materialeigenschaften des Bildes und die  
Eigenschaften seiner Fehler werden vom Endbild be-  
stimmt. So kann z.B. ein Stahlgegenstand untersucht  
werden, um festzustellen, ob er Rostflecke oder Hohl-  
räume im Metall aufweist. Es werden Annahme- und

Zurückweisungsentscheidungen gemacht auf der  
Grundlage dessen, was im endgültigen Bild gefunden  
wird, entweder von einer Bedienungsperson oder einem  
Algorithmus. Dann kann die Apriori-Information so-

wohl bei der Bildformation als auch bei der Bildverar-  
beitung benutzt werden oder nur von einem von beiden.  
Ein typisches großes interessierendes Teil für die  
Röntgen-Computertomographie-Untersuchung ist ein

Teil des Teiles zu schaffen, so daß der Computertomo-  
graphie-Schnitt parallel zur Symmetrieachse des Teiles  
liegt. Ein rekonstruiertes Computertomographie-Bild  
mit vollständigen Daten würde aussehen wie in Fig. 3a.

Für parallele Strahlendaten ergibt eine Abtastung über  
180° vollständige Daten. Ein Bild des gleichen Abschnitt-  
es, der charakteristische Merkmale eines Computerto-  
mographie-Bildes, aber mit unvollständigen Daten,

zeigt, ist bei 23 in Fig. 3b wiedergegeben. Die fehlenden  
Daten liegen in einem 40°-Kegel, von dem 180° parallel  
zur Längsachse des Teiles 22, wie es in Fig. 4 gezeigt ist.  
Der Querschnitt des Teiles ist beträchtlich höher als

breit und aufgrund des relativ großen Aspekts bzw. Ln-  
genverhältnisses des Schnittes ist das Eindringen der  
Röntgenstrahlen in der Längsrichtung ein Problem. Be-  
sonders bemerkenswert ist das Fehlen von Information  
über Wände, die parallel zu den fehlenden Datenrich-

tionen verlaufen, und es wurde festgestellt, daß im gan-  
zen Bild Artefakte vorhanden sind. Es ist klar, daß die  
Qualität des Teiles außerordentlich schwer zu beurtei-  
len ist auf der Grundlage solcher Bilder aus begrenztem

Winkel. Die Verfahren der Erfindung zum Einbeziehen  
merklicher Mengen genauerer Apriori-Information in das  
Bild mit unvollständigen NDE-Daten ergibt ein Bild ho-

her Qualität vergleichbar einem Bild mit vollständigen  
Daten.

Ein elektronisches CAD-Modell, ein festes Modell des  
Teiles, das abgeleitet ist von einem dreidimensionalen  
festen Modellierer, ist eine ausgezeichnete Quelle für

Information über die Geometrie des Teiles. Es wird Ge-  
brauch gemacht von praktisch der gesamten Informa-  
tion, die in der Bauseite eines ausgewählten Industrie-

teiles verfügbar ist. Ein elektronisches Modell ist einfach Teile, die in einem Format gespeichert wird, das zum Computergebrauch praktisch ist. Die spezifische mathematische Darstellung bestimmt die Genauigkeit des Modells des Gegenstandes: Einfache Drahtrahmenmodelle, die für diese Anwendung unannehmbar sind, können durch Punkte und diese verbindende Bögen geschaffen werden, während feste Modelle aus Oberflächen geschaffen werden können, die wiederum aus Kurven und Punkten geschaffen werden. Ein genaues festes Modell kann gerechnet und geschritten werden, um Information zu liefern über das Aussehen des Gegenstandes unter bestimmten Bedingungen, Information, die ohne Zerstören des Gegenstandes normalerweise nicht erhältlich ist. Das bevorzugte feste Modelliersystem ist die feste Modellierer TRUCE von General Electric, beschrieben in "TRUCE - The Tridimensional Rational Unified Cubic Engine - User's Guide", R.T. Farouki und J.R. Hinds (1985), General Electric Co. Corporate Research and Development, Postfach 8, Schenectady, New York 12301. Es kann auch auf die US-PS 46 18 924 Bezug genommen werden. Andere Festmodelliersysteme können benutzt werden, doch sollten sie eine ausreichende Genauigkeit für das tatsächliche Herstellen haben. Das Festmodell liefert genaue Information über die inneren Teilgrenzen sowie die äußeren Grenzen.

Eine andere Quelle für Apriori-Information ist die Physik des Untersuchungsverfahrens. So bestimmen z.B. die Röntgenphysik und -geometrie der Untersuchung, was der abgebildete Parameter bei der Röntgen-Computertomographie ist.

Information über die Geometrie des Teiles kann man auch mit einem Berührungssensor und anderen zusätzlichen Sensoren anzeigen erhalten, die während der Untersuchung des Teiles anfallen. Ein solcher Sensor liefert Information über den Ort des Teiles sowie zusätzliche Information darüber, wie weit ein hergestelltes Teil vom elektronischen Modell differiert. Ist das Teil relativ einfach und kann es vollständig durch einen Berührungssensor abgetastet werden, dann mag dieser die einzige Quelle für die zusätzliche Apriori-Information über die äußere Begrenzung des Teiles sein.

Es sind verschiedene Techniken zum Einbeziehen von Modellinformation in Computertomographie-Bilder mit begrenztem Winkel entwickelt worden, um die Bildqualität zu verbessern. Es werden drei Lösungsweg zum Einbeziehen von Apriori-Information diskutiert, der Lösungsweg über die iterative Rekonstruktion und der Lösungsweg über die Bildanalyse und -verarbeitung. Das Grundkonzept ist in Fig. 4 veranschaulicht, wo die gemessenen Projektionen 24 an verfügbaren Betrachtungswinkeln über den begrenzten Winkelbereich mit synthetisierten fehlenden Projektionen 25 aus dem Modell an fehlenden Betrachtungswinkeln über den nicht verfügbaren Abtastbereich kombiniert sind, um die Qualität des Computertomographie-Bildes zu verbessern.

Der Lösungsweg mit den Projektionsdaten gemäß Fig. 5, Blöcke 26 bis 29, umfaßt das Erwerben gemessener Projektionsdaten über den verfügbaren Winkelbereich, das Errechnen von Projektionsdaten aus dem festesten Modell über den fehlenden Winkelbereich und das Rekonstruieren des Computertomographie-Bildes aus dem gemessenen und errechneten Projektionsdaten im fehlenden Winkelbereich. Die gemessenen und errechneten Projektionsdaten sind im Winkelbereich einander gegenüberliegend. Die gemessenen Winkelbereich ist ein Bereich, der gemessenen Daten aus dem Winkelbereich des Computermodells besteht. Die errechneten Winkelbereich ist ein Bereich, der aus dem Winkelbereich des Computermodells besteht. Die gemessenen Winkelbereich ist ein Bereich, der gemessenen Daten aus dem Winkelbereich des Computermodells besteht. Die errechneten Winkelbereich ist ein Bereich, der aus dem Winkelbereich des Computermodells besteht.

Fig. 6, Blöcke 30 bis 34, zeigt einen Schnitt durch das dreidimensionale feste Modell. Röntgenquerschnitte sind in Fig. 6, Blöcke 30 bis 34, gezeigt. Ein Schnitt durch das dreidimensionale feste Modell wird in ein zweidimensionales Pixelbild umgewandelt, und Pfadlängen, die von Röntgenstrahlen genommen werden würden, sind errechnet. Ist der Röntgendetektor eine Reihe, dann mag es eine große Zahl von zu erreichenden Pfadlängen geben, vom Brennpunkt der Quelle zu jedem Detektorelement. Die Pfadlängen im Teil im fehlenden Winkelbereich können errechnet werden unter Verwendung der Donner-Algorithmen für die Rekonstruktionstomographie, R.H. Huseman et al., Lawrence Berkeley Laboratory, Universität von Kalifornien (1977). Das Donner-Paket liefert auch die grundlegende Computertomographie-Rekonstruktionsfunktion. Die Röntgenschwächung des Teiles hängt von der Pfadlänge ab, dem Material des Teiles und der Röntgenenergie ab. Das Material ist auf der Blosause angegeben, und wenn es eine Metalllegierung ist, dann sind die Bestandteile der Legierung bekannt. Ein geeignetes Rechenverfahren besteht darin, die mittlere Energie der Röntgenröhre zu benutzen. Veröffentlichte Tabellen enthalten einen Schwächungskoeffizienten für jedes Element der Legierung, und diese werden gemäß einer gegebenen Formel gemischt. Multiplizieren der Pfadlänge mit dem Koeffizienten ergibt die Projektionsdaten. Eine genaue Berechnung besteht darin, Tabellen zu benutzen, die auf alle Energien in der Röntgenröhre anwendbar sind; eingeben wird die Pfadlänge und die Schwächung wird direkt errechnet.

Der Lösungsweg der iterativen Rekonstruktion, dargestellt in den Fig. 7 und 8, beruht auf einem Verfahren, das in dem oben genannten Artikel von Tam und Perez-Medez veröffentlicht ist, aber eine deutlich verbesserte Apriori-Information benutzt. Eine Röntgenastung des Teiles wird über den verfügbaren begrenzten Winkelbereich ausgeführt und gemessene Projektionsdaten werden gesammelt. Gemäß den Blöcken 35 bis 37 in Fig. 7 wird ein reales Teilbild eines Teiles von den verfügbaren Projektionsdaten rekonstruiert, wobei man die gefilterte Rückprojektion oder einen anderen Algorithmus benutzt. Bei diesem Lösungsweg wird das rekonstruierte Bild zwischen dem Gegenstandsraum durch gefilterte Rückprojektion und dem Projektionsraum durch Projektion hin und her transformiert und dabei wiederholt durch eine Apriori-Information über den Gegenstand im Gegenstandsraum und die bekannten Projektionen im Projektionsraum korrigiert. Drei Arten von Apriori-Information, die Blöcke 38 und 42 bis 44 werden auf das Bild mit begrenztem Winkel angewendet. Ein Modell des Teiles wird geschaffen und Information über die Grenzen des Teiles errechnet. Das elektronische Modell, das von einem Festmodelliersystem abgeleitet wird, liefert genaue Information über die Außenbegrenze, und wenn das Teil, wie das in Fig. 3a, teilweise hohl ist, ebenso genaue Information über die inneren Grenzen. Alternativ die dreidimensionale Außenhülle, vorausgesetzt ein Berührungssensor kann benutzt werden, doch gibt dieser nur Information über die Außenbegrenze. Eine andere Alternative besteht darin, die gemessenen und errechneten Projektionsdaten im Winkelbereich einander gegenüberliegend. Die gemessenen Winkelbereich ist ein Bereich, der gemessenen Daten aus dem Winkelbereich des Computermodells besteht. Die errechneten Winkelbereich ist ein Bereich, der aus dem Winkelbereich des Computermodells besteht.

DE-OS 38 06 110 beschreibt, Dies ergibt jedoch nur

Information über die Außengrenze. Die Schwächung durch das Teil wird bereits beschrieben errechnet, indem man die Pfadlänge durch das Teil, den Schwächungskoeffizienten bei bekanntem Material des Teiles und die Röntgenquelleneenergie berechnet und diese beiden Parameter multipliziert.

Pixelwerte im realen Computertomographie-Teilbild 37 werden eingestellt, indem man zuerst Pixel außerhalb der Grenze des Teiles auf Null setzt. Wo die Information über die Grenze des Teiles von einem elektronischen Modell erhalten wird, sind die äußeren und inneren Grenzen beide zu einem hohen Genauigkeitsgrad bekannt. Als zweites werden negative Pixel auf Null gesetzt. Als drittes setzt man Pixel, die größer sind als ein ausgewählter maximaler Schwächungswert, auf den Maximalwert. Das Maximum kann z.B. die errechnete Schwächung oder das Doppelte dieses Wertes sein. Die fehlenden Projektionsdaten, Block 39, in Winkeln außerhalb des begrenzten Winkelbereiches, werden aus dem erhaltenen modifizierten Bild errechnet. Dann rekonstruiert man aus den gemessenen Projektionsdaten im verfügbaren Winkelbereich und den errechneten Projektionsdaten vom modifizierten Computertomographie-Bild im fehlenden Winkelbereich ein neues Bild. Das vorgenannte Verfahren wird, wie erforderlich, wiederholt bzw. iteriert. Eine Reihe von fortschreitend verbesserten Bildern 37 wird rekonstruiert, bis eine ausreichende Bildqualität erhalten ist. Die iterativen Rekonstruktionen konvergieren und ein geeigneter Konvergenztest, Block 40, bestimmt, ob eine weitere Iteration erforderlich ist oder ob die Qualität ausreicht, das endgültige Bild 41 auszugeben.

Das Verfahren zur Bildverarbeitung und -analyse, Fig. 9, steht in Beziehung zum Projektions-Lösungsweg, hat aber den Vorteil, das Verarbeiten des fehlerkorrigierenden Bildes indirekt bzw. rechnerunabhängig sowie einen leichten Zugang zu Daten an anderen Punkten als beim Lösungsweg mit Projektionsdaten zu gestatten. Das Diagramm ist für parallele Strahldaten, bei denen eine Abtastung über 180° vollständige Daten liefert. Das Teil wird mit Röntgenstrahlen über den begrenzten Winkelbereich  $\Theta$ , Block 45-47, abgetastet und die gemessenen Projektionsdaten werden in den verfügbaren Betrachtungswinkel gesammelt. Wendet man den Rekonstruktionsalgorithmus der gefilterten Rückprojektion an, dann wird ein reales Teilbild des Teiles aus den verfügbaren Meßdaten rekonstruiert. Modell-Projektionsdaten bei einem vollständigen Satz von Betrachtungswinkeln werden errechnet, Blöcke 48 und 49. In der gleichen Weise wie vorher wird ein elektronisches Modell des Teiles geschaffen, und Pfadlängen durch das Teil werden sowohl in den verfügbaren Betrachtungswinkeln über den Bereich  $\Theta$  als auch die fehlenden Betrachtungswinkel über den Bereich  $\Pi - \Theta$  errechnet. Schwächungskoeffizienten werden aus den bekannten physikalischen Parametern des Teiles und der Röntgenquelle errechnet, und die Pfadlänge wird mit dem Schwächungskoeffizienten multipliziert. Ein reales Computertomographie-Teilbild Modell 50 wird aus dem Modell-Projektionsdaten über den gleichen Winkelbereich wie die gemessenen Projektionsdaten rekonstruiert. Ein vollständiges Computertomographie-Teilbild 51 wird aus den vollständigen Modell-Projektionsdaten über den Eingabebereich  $\Pi$  rekonstruiert. Ein Modell-Differenzbild, Block 52, wird durch Subtraktion und Normalisierung der vollständigen Modell- und realen Teilbilder konstruiert. Das Differenzbild, das den Rekonstruktionsfehler bei begrenztem Winkel darstellt,

wird dann bei 53 mit dem Teilbild kombiniert oder summiert, das aus gemessenen Projektionsdaten rekonstruiert ist, um das beste Computertomographie-Bild 54 des Teiles zu erhalten. Wie bei 55 gezeigt, können in dieser Stufe andere Bildverarbeitungen ausgeführt werden. Es wurden drei Techniken und Verfahren zum Verbessern der Qualität von NDE-Bildern durch Einbeziehen genauerer A-priori-Information diskutiert. Welches Verfahren ausgewählt wird, hängt von der Art von Fehlern ab, die gesucht wird.

Der Lösungsweg bzw. das Herangehen über die iterative Rekonstruktion ist, obwohl computermäßig intensiv, am besten, um Hohlräume festzustellen, weil es einen starken Kontrast mit dem Ausgangsmaterial gibt. Ein Mikroskopiker ist andererseits nahe dem Hintergrund mit nur 5 bis 10% Unterschied, und der Lösungsweg über die Projektionsdaten ist am besten, weil er Artefakte beseitigt. Es wurde festgestellt, daß einige Teile, die früher mit den üblichen NDE-Techniken nicht untersuchbar waren, nun unter Anwendung dieser Verfahren untersuchbar sind.

Die Erfindung kann bei nahezu jeder NDE-Abbildungs-technik benutzt werden, einschließlich der Röntgen-Computertomographie, der Digital-Radiographie, Ultraschalluntersuchung (B-Abtastung, C-Abtastung usw.), der Wirbelstromuntersuchung, der IR- und visuellen Untersuchung und anderen, doch ist sie darauf nicht beschränkt. Bei jedem dieser Abbildungsmodalityen kann es einen Grund dafür geben, warum nur unvollständige Daten gesammelt werden können. Der Grund, warum vollständige Daten nicht gemessen werden können, wird augenscheinlich sein. Das Verfahren des NDE-Abbildens durch Einbeziehen von A-priori-Information wird folgendermaßen zusammengefaßt:

Ein Teil wird mit einem Abbildungsmittel (Röntgenstrahlen, Ultraschall, IR-Strahlung usw.) über den verfügbaren Abtastbereich abgetastet, und es werden gemessene Abbildungsparameter-Daten erzeugt. Von einem dreidimensionalen Modell des Teiles wird die relevante Geometrie des Teiles errechnet. Ausgewählte physikalische Parameter und Eigenschaften des Teiles sowie die Abbildungsmittelquelle sind bekannt. Die Information über die Geometrie des Teiles und dessen physikalische Eigenschaften werden kombiniert, um eine rechnerische Abbildungsparameter-Daten über einen nicht verfügbaren Abtastbereich zu bestimmen, der aufgrund einer Einschränkung nicht abgetastet werden kann. Dann wird ein Bild des Teiles aus den kombinierten gemessenen und errechneten Daten gebildet. Weitere Information und Simulationsergebnisse unter Verwendung eines CAD-Modells des Betätigungsmittels werden von den Erfindern in ihrer technischen Veröffentlichung "Use of a Priori Information in Incomplete Data X-ray CT Imaging", Review of Progress in Quantitative Non-destructive Evaluation, Band 7, Seiten 723-730.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Abbilden bei der zerstörungsfreien Untersuchung durch Einbeziehen von A-priori-Information, umfassend:

Abtasten eines Teiles mit einem Abbildungsmittel über einen verfügbaren Abtastbereich und Erzeugen gemessener Abbildungsparameter-Daten;

Schaffen eines dreidimensionalen Modells des Teiles und Errechnen der relevanten Geometrie des Teiles sowie Lieferung ausgewählter physikalischer Eigenschaften des Teiles und einer Abbildungsmittel-

Information, umfassend:

Abtasten eines Teiles mit einem Abbildungsmittel über einen verfügbaren Abtastbereich und Erzeugen gemessener Abbildungsparameter-Daten;

Schaffen eines dreidimensionalen Modells des Teiles und Errechnen der relevanten Geometrie des Teiles sowie Lieferung ausgewählter physikalischer Eigenschaften des Teiles und einer Abbildungsmittel-

Kombinieren der Geometrie des Teiles und der physikalischen Eigenschaften und Bestimmen der rechnerischen Abbildungsparameter-Daten über einen nicht zugänglichen Abstrahbereich, der aufgrund einer Beschränkung nicht abgetastet werden kann und Formen eines Bildes des genannten Teiles aus den gemessenen und errechneten Daten.

2. Verfahren nach Anspruch 1, worin das Abbildungsmittel Röntgenstrahlen sind.

3. Verfahren nach Anspruch 1, worin das Modell ein elektrisches Modell ist, das abgeleitet ist von einem festen Modelliersystem.

4. Verfahren nach Anspruch 3, worin das Kombinieren und Bestimmen das Berechnen von Abbildungsmittel-Pfadlängen durch das Modell und das Berechnen der Schwächung des Abbildungsmittels aus den genannten physikalischen Eigenschaften umfaßt.

5. Verfahren zum Abbilden bei der zerstörungsfreien Untersuchung unter Verwendung verbesserter Apriori-Information, umfassend:

Abtasten eines Teiles mit einem Abbildungsmittel über einen begrenzten Winkelbereich und Erzeugen gemessener Projektionsdaten in verfügbaren Betrachtungswinkeln;

Schaffen eines elektronischen Modells des Teiles, das von einem dreidimensionalen Festmodellgeleiter abgeleitet ist, Berechnen des Modells bei den fehlenden Betrachtungswinkeln;

Berechnen der Schwächung des Abbildungsmittels durch das Teil aus bekannten physikalischen Parametern;

Bestimmen berechneter Projektionsdaten an den fehlenden Betrachtungswinkeln aus den Pfadlängen, fehlenden Betrachtungswinkeln aus den Pfadlängen und der Schwächung und

Rekonstruieren eines Bildes des Teiles aus den gemessenen und berechneten Projektionsdaten.

6. Verfahren nach Anspruch 5, worin das Abbildungsmittel Röntgenstrahlen sind.

7. Verfahren nach Anspruch 6, worin die physikalischen Parameter die Materialien des Teiles und die Röntgenquellenenergie sind.

8. Verfahren nach Anspruch 5, worin das Berechnen der Pfadlänge durch das Modell eine Zwischenstufe des Umwandels der Geometrie des Teiles aus dem elektronischen Modell in ein zweidimensionales Bild umfaßt, von dem die Pfadlängen ausgerechnet werden.

9. Verfahren zum Abbilden bei einem zerstörungsfreien Untersuchen unter Verwendung verbesserter Apriori-Information, umfassend:

Abtasten eines Teiles mit Röntgenstrahlen über einen begrenzten Winkelbereich und Erzeugen gemessener Projektionsdaten in verfügbaren Betrachtungswinkeln;

Schaffen eines elektronischen Modells des Teiles, das von einem dreidimensionalen Festmodellgeleiter abgeleitet ist und Berechnen der Röntgenspfadlängen durch das elektronische Modell an fehlenden Betrachtungswinkeln;

Berechnen der Schwächung aus bekannten physikalischen Parametern des Teiles und einer Röntgenquelle;

Bestimmen berechneter Projektionsdaten an den fehlenden Betrachtungswinkeln aus den Pfadlängen;

Bestimmen berechneter Projektionsdaten an den fehlenden Betrachtungswinkeln aus den Pfadlängen und Bestimmen der rechnerischen Abbildungsparameter-Daten über einen nicht zugänglichen Abstrahbereich, der aufgrund einer Beschränkung nicht abgetastet werden kann und Formen eines Bildes des genannten Teiles aus den gemessenen und errechneten Daten.

2. Verfahren nach Anspruch 1, worin das Abbildungsmittel Röntgenstrahlen sind.

3. Verfahren nach Anspruch 1, worin das Modell ein elektrisches Modell ist, das abgeleitet ist von einem festen Modelliersystem.

4. Verfahren nach Anspruch 3, worin das Kombinieren und Bestimmen das Berechnen von Abbildungsmittel-Pfadlängen durch das Modell und das Berechnen der Schwächung des Abbildungsmittels aus den genannten physikalischen Eigenschaften umfaßt.

5. Verfahren zum Abbilden bei der zerstörungsfreien Untersuchung unter Verwendung verbesserter Apriori-Information, umfassend:

Abtasten eines Teiles mit Röntgenstrahlen über einen begrenzten Winkelbereich und Erzeugen gemessener Projektionsdaten in verfügbaren Betrachtungswinkeln;

Schaffen eines elektronischen Modells des Teiles, das von einem dreidimensionalen Festmodellgeleiter abgeleitet ist und Berechnen der Röntgenspfadlängen durch das elektronische Modell an fehlenden Betrachtungswinkeln;

Berechnen der Schwächung aus bekannten physikalischen Parametern des Teiles und einer Röntgenquelle;

Bestimmen berechneter Projektionsdaten an den fehlenden Betrachtungswinkeln aus den Pfadlängen;

Bestimmen berechneter Projektionsdaten an den fehlenden Betrachtungswinkeln aus den Pfadlängen und Bestimmen der rechnerischen Abbildungsparameter-Daten über einen nicht zugänglichen Abstrahbereich, der aufgrund einer Beschränkung nicht abgetastet werden kann und Formen eines Bildes des genannten Teiles aus den gemessenen und errechneten Daten.



- wert sind, auf den Maximalwert setzt;  
Berechnen der fehlenden Projektionsdaten von einem modifizierten Bild bei Winkeln außerhalb des begrenzten Winkelbereiches;  
Rekonstruieren eines neuen Bildes aus den gemessenen Projektionsdaten und berechneten fehlenden Projektionsdaten und  
iteratives Rekonstruieren einer Reihe fortschreitend verbesserter Bilder, bis eine genügende Qualität erhalten wird.  
10 14. Verfahren nach Anspruch 13, worin das Abbildungsmittel Röntgenstrahlen sind.  
15 15. Verfahren nach Anspruch 13, worin das Modell ein elektronisches Modell ist, abgeleitet von einem dreidimensionalen Festmodellgeber.

20  
25  
30  
35  
40  
45  
50  
55  
60  
65

FIG. 1

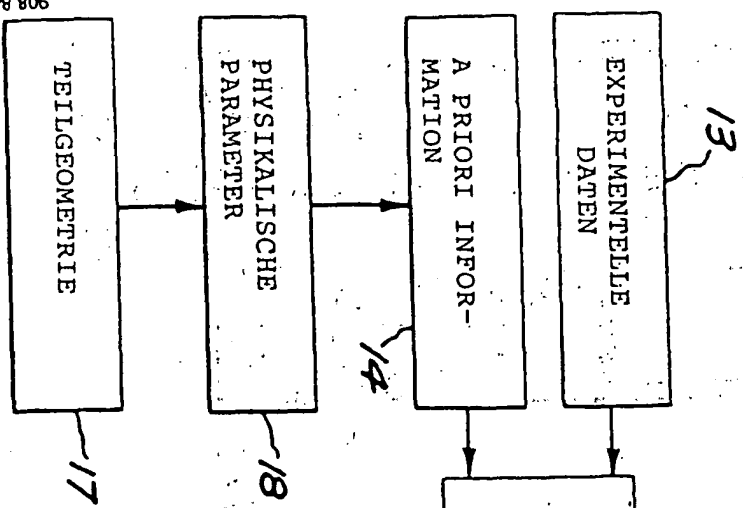
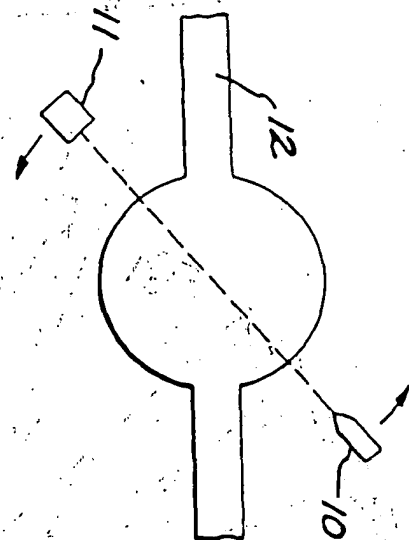
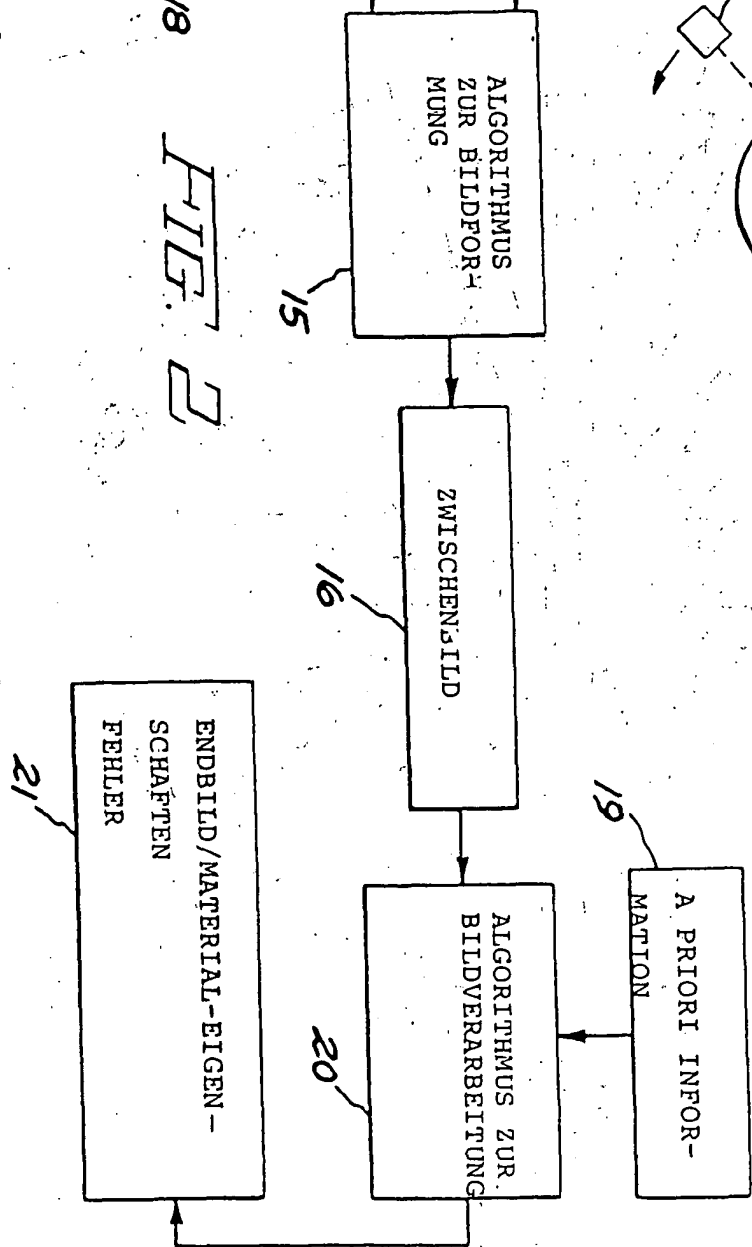


FIG. 2



908 848/606

3915370

FIG. 3A

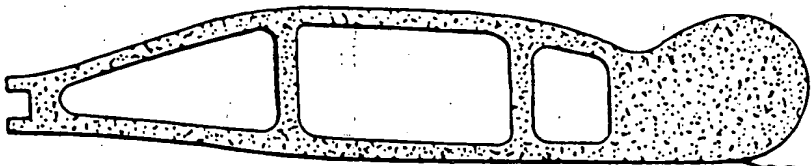
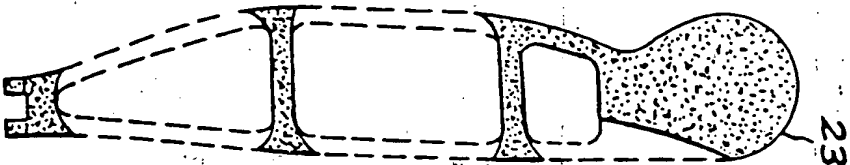


FIG. 3B



GEMESSENE PROJEKTIONEN  
(140°)

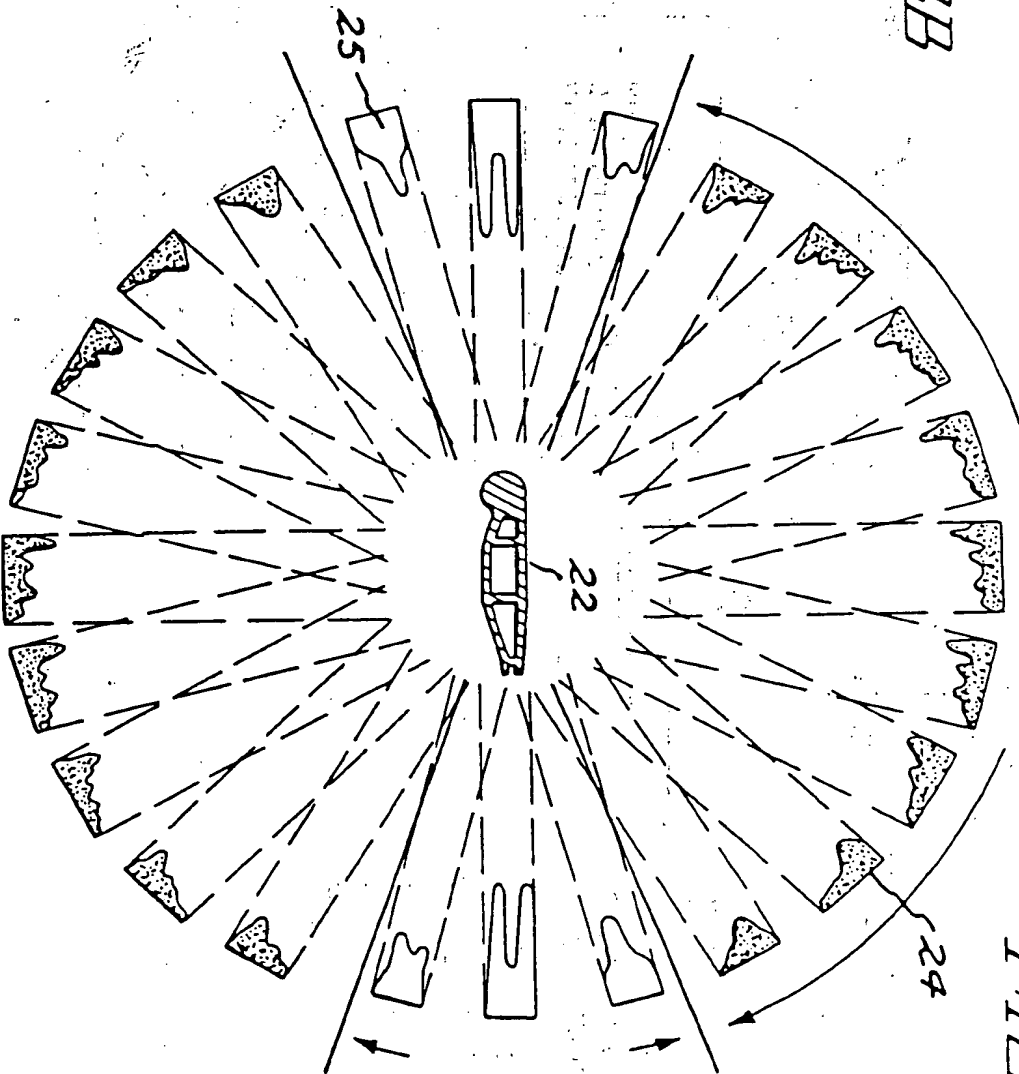


FIG. 4

SYNTHETISIERTE  
FEHLENDE  
PROJEKTIONEN  
VOM MODELL  
(40°)

HERANGEHEN MITTELS PROJEKTIONS DATEN

FIG. 5

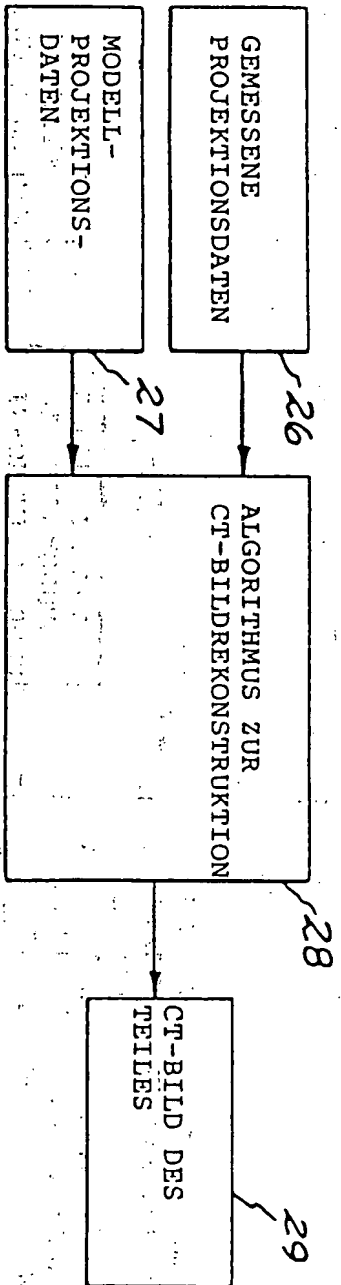
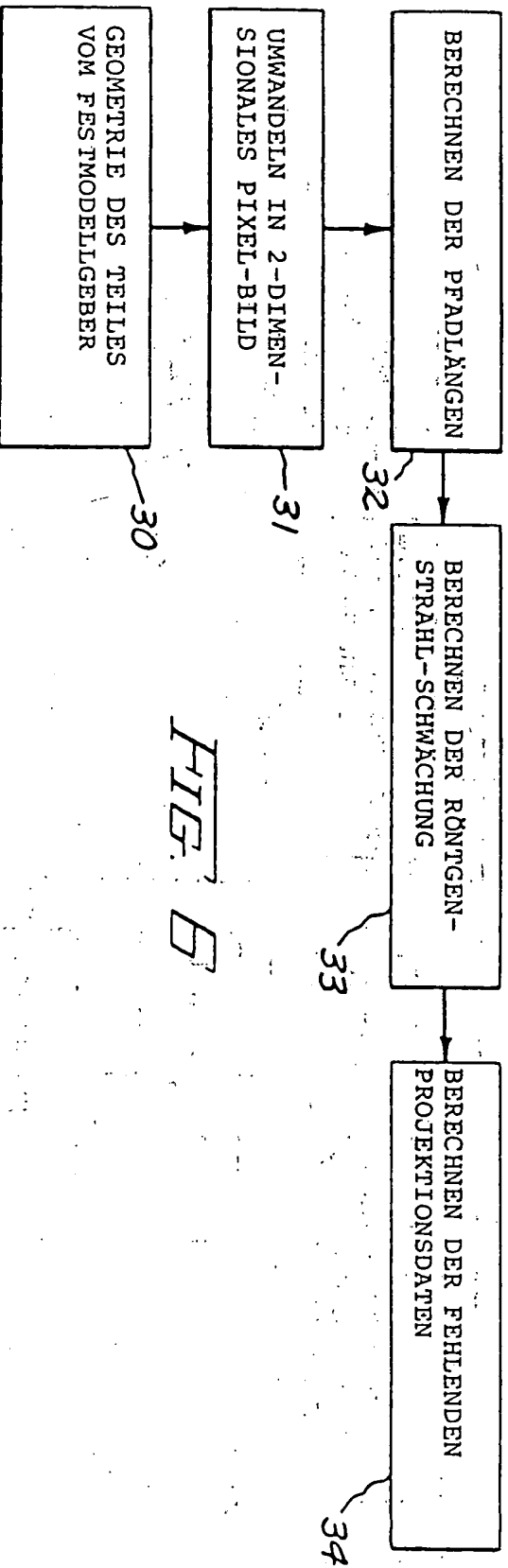


FIG. 6



HERANGEGEHEN DURCH ITERATIVE REKONSTRUKTION

FIG. 7

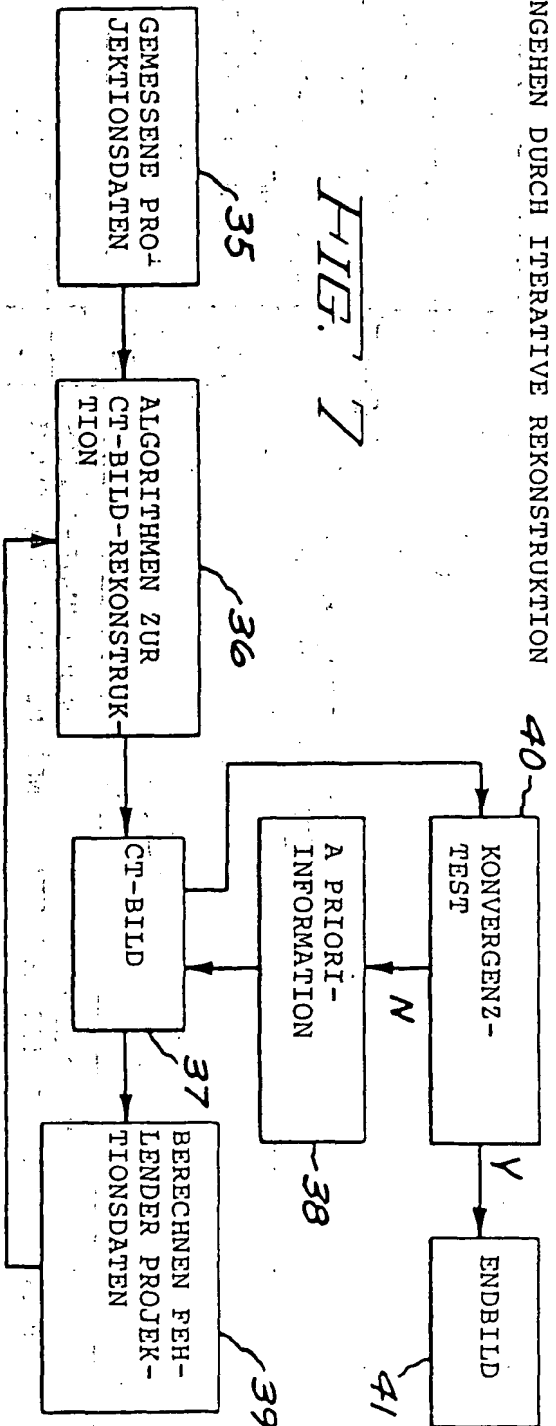
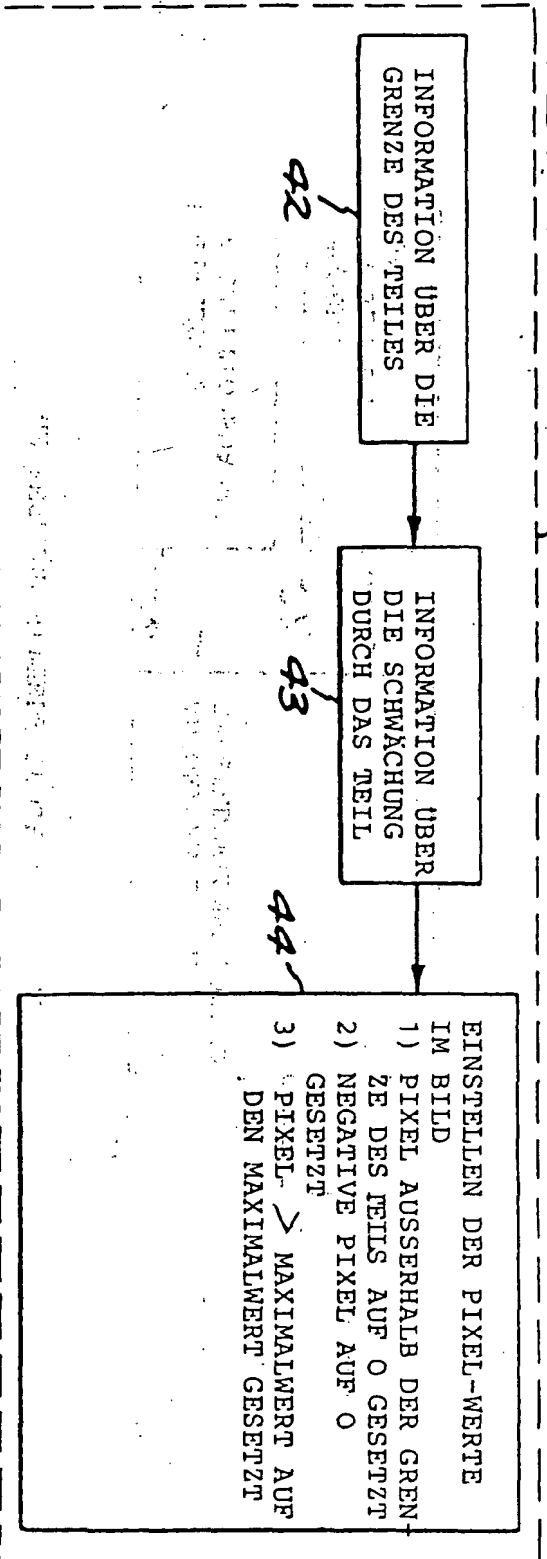


FIG. 8



# HERANGEGEHEN ÜBER BILDERARBEITUNG UND -ANALYSE

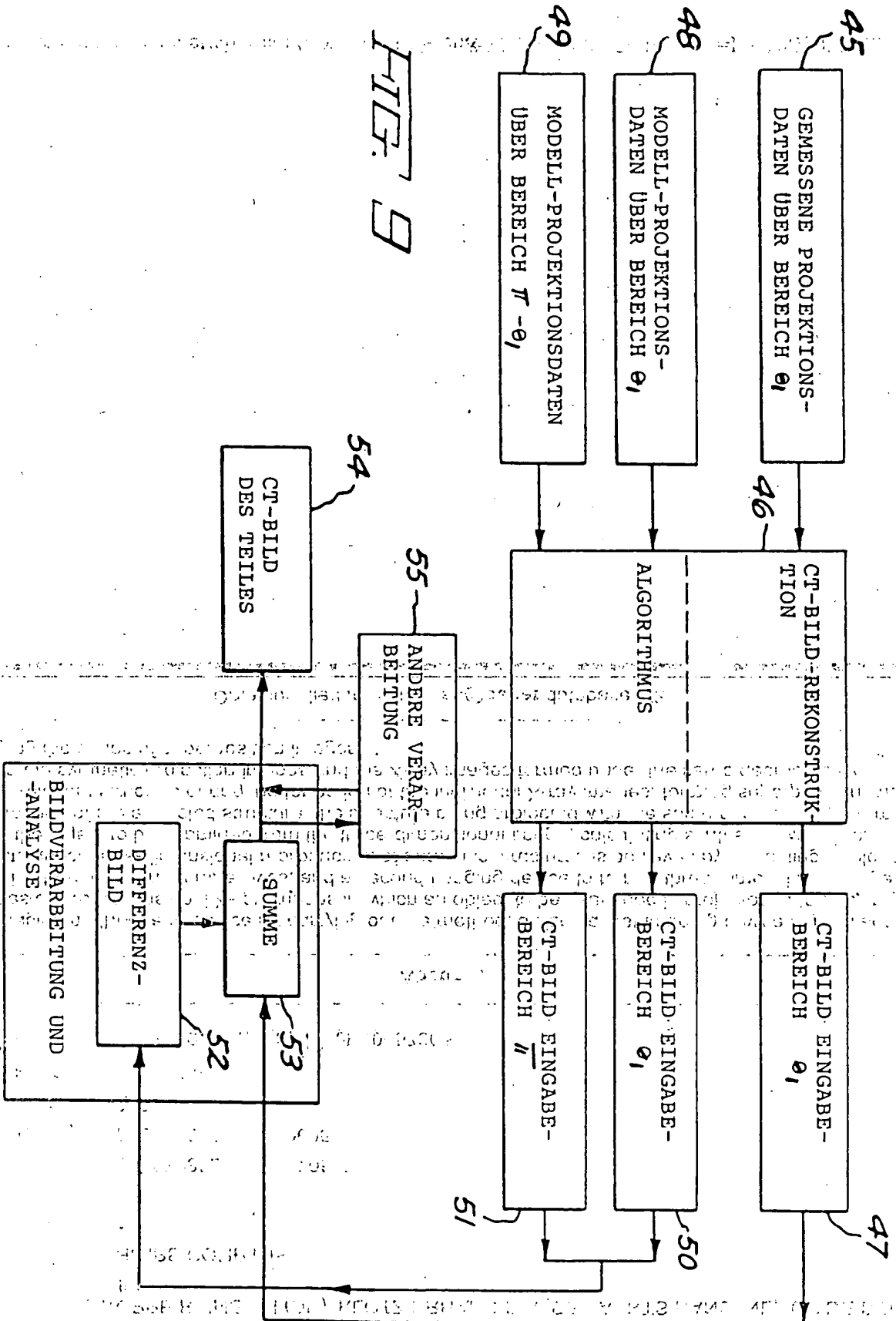


FIG. 9